

TARTU ÜLIKOOL

Loodus- ja täppisteaduste valdkond

Füüsika instituut

Gutnar Leede

**GALAKTIKATE PÖÖRLEMISTELGEDE LEIDMINE  
OTSUSTUSMETSJA JA BAYESI MEETODIGA**

Magistritöö (30 EAP)

Füüsika

Juhendaja:  
Elmo Tempel

Tartu 2019

# **Galaktikate pöörlemistelgede leidmine otsustusmetsa ja Bayesi meetodiga**

Varasemate tööde tulemused näitavad, et galaktikate pöörlemisteljed on seotud paiknemisega Universumi suureskaalalises struktuuris. Rakendame otsustusmetsa ja Bayesi meetodit, et hinnata galaktikate kuju kolmeteljeliste ellipsoididena ning uurime joondumist Bisous' mudeli filamentide suhtes. Korrekse statistilise modelleerimise teel saame statistiliselt usaldusväärsema joondumise signaali kui lihtsat kettalähendust kasutades.

Märksõnad: galaktika, pöörlemistelg, Bayes, otsustusmets, filament, joondumine  
CERCS: P520 — Astronoomia, kosmoseuuringud, kosmosekeemia

## **Estimating galaxy axis of rotation using random forest and Bayesian inference**

Previous results have shown that the rotation axes of galaxies are correlated with their placement in the large scale structure of the Universe. We use random forests and Bayesian inference to estimate the shapes of galaxies as triaxial ellipsoids and investigate alignment in Bisous model filaments. By means of correct statistical modeling, we get a statistically more reliable alignment signal than by using a simple disk approximation.

Keywords: galaxy, axis, rotation, Bayes, random forest, filament, alignment  
CERCS: P520 — Astronomy, space research, cosmic chemistry

# Sisukord

<b>Sissejuhatus</b>	<b>5</b>
<b>1 Teooria</b>	<b>6</b>
1.1 Universumi suuremastaabiline struktuur . . . . .	6
1.1.1 Bisous' mudel . . . . .	6
1.1.2 Galaktikate pöörlemistelgede joondumine filamentides . . . . .	7
1.2 Galaktika kolmemõõtmelise struktuuri taastamine . . . . .	7
1.2.1 Galaktika ellipsoidiline mudel . . . . .	8
<b>2 Andmed ja meetodid</b>	<b>13</b>
2.1 GAMA galaktikate valim . . . . .	13
2.2 Bisous' mudeli filamendid . . . . .	14
2.3 Galaktikate valimi sisemiste telgede pikkuste suhete jaotuse hindamine . . . . .	16
2.4 Galaktika pöörlemistelje suunavektori hindamine . . . . .	17
2.5 Üksikgalaktika pöörlemistelje suunavektori hindamine otsustusmetsa abil . . . . .	18
<b>3 Tulemused</b>	<b>20</b>
3.1 Spiraalsete ja elliptiliste galaktikate sisemiste telgede suhete jaotused . . . . .	20
3.2 Otsustusmets . . . . .	24
3.2.1 Otsustusmetsa tulemused kolme galaktika näitel . . . . .	28
3.3 Galaktikate telgede joondumine . . . . .	32
3.3.1 Spiraalsete galaktikate telgede joondumine . . . . .	33
3.3.2 Elliptiliste galaktikate telgede joondumine . . . . .	34
<b>Kokkuvõte</b>	<b>35</b>
<b>Tänuavaldused</b>	<b>36</b>
<b>Kirjandus</b>	<b>37</b>



# Sissejuhatus

Galaktikad ei ole Universumis jaotunud ühtlaselt, vaid need moodustavad suurel skaalal nn kosmilise kõrgstruktuuri, milles on suured tühikud, galaktikate parved ja parvede vahelised galaktikate jasad, mida nimetatakse filamentideks (Zeldovich et al., 1982). Varasemad tööd on leidnud, et galaktikate pöörlemisteljed võivad olla seotud nende paiknemisega suuremastaabilises struktuuris (Tempel et al., 2013).

Vaadeldes galaktikaid näeme nende ortogonaalseid projektsioone, millel on üldiselt ellipsikujulised kontuurid ja mille täpsemad kujud sõltuvad galaktikate kolmemõõtmelisest struktuurist. Käesoleva magistritöö eesmärk on taastada projektsioonide põhjal galaktikate kolmemõõtmelised struktuurid ja seeläbi hinnata pöörlemistelgede suundi. Kasutame selleks Bayesi meetodit lähtudes eeldusest, et galaktikad on ruumis suvaliselt orienteeritud ja sobitades vaadeldud galaktikate projektsioonide kujusid kirjeldava tunnuse jaotust.

Peale Bayesi meetodi rakendamise töös otsustusmetsa meetodit, et kasutada lisaks galaktika projektsiooni kujule ka selle teisi parameetreid nagu heledus, suurus ja punanihe. Selleks treenime otsustusmetsa, mis ennustab galaktika parameetrite põhjal selle elliptiliste projektsioonide näivate telgede suhete jaotuse kuju ning seejärel kasutame Bayesi meetodit, et taastada galaktika kolmemõõtmelist struktuuri kirjeldavate tunnuste jaotused.

Töö on jaotatud kolme peatükki, millest esimeses kirjeldame Universumi suuremastaabilist struktuuri, esitame galaktika ellipsoidilise mudeli ja avaldame selle põhjal oodatava projektsiooni matemaatilise avaldise. Teises peatükis kirjeldame statistiliseks modelleerimiseks kasutatud meetodeid, mille järgi leiame hinnangu galaktika struktuurile ja selle pöörlemistelje suunale ruumis. Kolmandas peatükis uurime galaktikate pöörlemistelgede seost paiknemisega suuremastaabilises struktuuris ja esitame saadud tulemused.

# 1 Teooria

## 1.1 Universumi suuremastaabiline struktuur

Suurtel skaaladel järgib galaktikate jaotus Universumis nn kärgstruktuuri. Enamik galaktikatest asetsevad suurtes parvedes, mille vahel on niitjad galaktikate jasad, mida nimetatakse filamentideks. Parvede vahel on suured tühikud, kus pole peaaegu ühtegi galaktikat. Zeldovich et al. (1982)

Vaatluste põhjal on selgunud, et galaktikate vaadeldavad omadused on korreleeritud nende paiknemisega suuremastaabilises struktuuris. Näiteks on leitud, et elliptilised galaktikad asetsevad pigem suurema tihedusega piirkondades ja spiraalsed galaktikad väiksema tihedusega piirkondades (Einasto et al., 1974; Dressler, 1980).

### 1.1.1 Bisous' mudel

Universumi suuremastaabilise struktuuri kirjeldamiseks on loodud erinevatel lähteandmetel põhinevaid meetodeid, näiteks veekogude segmenteerimine (*watershed segmentation*) (Platen et al., 2007), skeletonanalüüs (Novikov et al., 2006) ning algoritme, mis põhinevad gravitatsioonivälja potentsiaali Hessianil (Hahn et al., 2007) või kiiruste vektorväljal (Forero–Romero et al., 2009).

Käesolevas töös kasutame Tempel et al. (2014) loodud Bisous' mudelit, mis modelleerib suuremastaabilist struktuuri galaktikate jaotuse põhjal. Bisous' mudel on markeeritud punktprotsess, mille realisatsiooniks on silindriliste objektide konfiguratsioon, mis moodustavad filamentide võrgustiku. See mudel proovib tagada võimalikult ühtlase galaktikate jaotuse piki silindreid ning sellist paigutust, et seespool silindreid oleks galaktikaid oluliselt rohkem kui väljaspool. Tempel et al. (2014)

Bisous' mudeli silindri parameetrid on keskkoha asukoht, orientatsioon, raadius ja pikkus. Lisaks defineeritakse teatud raadiusega atraktsioonisfäär, mis silindrite aluspindade keskele paigutatult

määravad silindrite ühenduvuse. Omavahel ühendatud silindrite konfiguratsioon moodustab filamentaarse struktuuri, kus filamentide peateljed ühtivad silindrite telgedega (Tempel et al., 2014).

### 1.1.2 Galaktikate pöörlemistelgede joondumine filamentides

Mitmed varasemad tööd on uurinud galaktikate pöörlemistelje seost keskkonnaga suurel skaalal, kuid on leidnud vastuolulisi tulemusi. Erinevad tulemused võivad olla tingitud ebatäpsusest galaktikate pöörlemistelgede määramisel või erinevustest suuremastaabilise struktuuri kirjeldamisel (Tempel et al., 2013).

Tempel et al. (2013) rakendas Bisous' mudelit Sloani digitaalse taevaülevaate andmetele ja leidis, et lihtsa lähendusega pöörlemistelje määramisel on spiraalsete galaktikate pöörlemisteljed filamentidega pigem paralleelsed ja elliptiliste galaktikate pöörlemisteljed on pigem risti. Käesolevas töös proovime hinnata võimalikult hästi galaktikate pöörlemistelgede orientatsioone ja uurida galaktikate joondumist filamentides peatükis 2.1 kirjeldatud GAMA andmete põhjal.

## 1.2 Galaktika kolmemõõtmelise struktuuri taastamine

Galaktika pöörlemistelje leidmine eeldab galaktika kirjeldamist kolmemõõtmelises ruumis. Galaktika vaatlemisel näeme selle ellipsikujulise kontuuriga projektsiooni, millel on teatud näiv telgede suhe  $q$  ja positsiooninurk  $p$ , mis on nurk ellipsi lühema telje ja taevas põhja suuna vahel. Seame eesmärgiks kasutada neid mõõdetud suuruseid, et leida galaktika pöörlemistelje suunavektor  $\vec{\omega}$  kolmemõõtmelises ruumis.

Mitmed varasemad tööd on galaktikate kaldenurkade leidmisel kasutanud lihtsat galaktika kirjeldust telgsümmeetrilise kettana, mille lühema ja pikema telje suhe on  $\xi$ . Selle lähenduse järgi langeb galaktika pikem telg kokku selle projektsiooni pikema teljega ning ketta pöörlemistelje ja vaatesihi vahelise kaldenurga  $\theta$  annab valem

$$\cos^2 \theta = \frac{q^2 - f^2}{1 - f^2}. \quad (1.1)$$

Kuna galaktikate kaks pikemat telge on peamiselt sarnaste pikkustega, siis toimib ketta-lähend üldiselt hästi ja seetõttu on keerulisemat varianti enamasti ignoreeritud. Käesolevas töös kasutame galaktika kirjeldamiseks ja pöörlemistelje suunavektori  $\vec{\omega}$  taastamiseks keerulisemat ja täpsemat ellipsoidilist mudelit, kus kõik kolm telge võivad olla eripikkused.

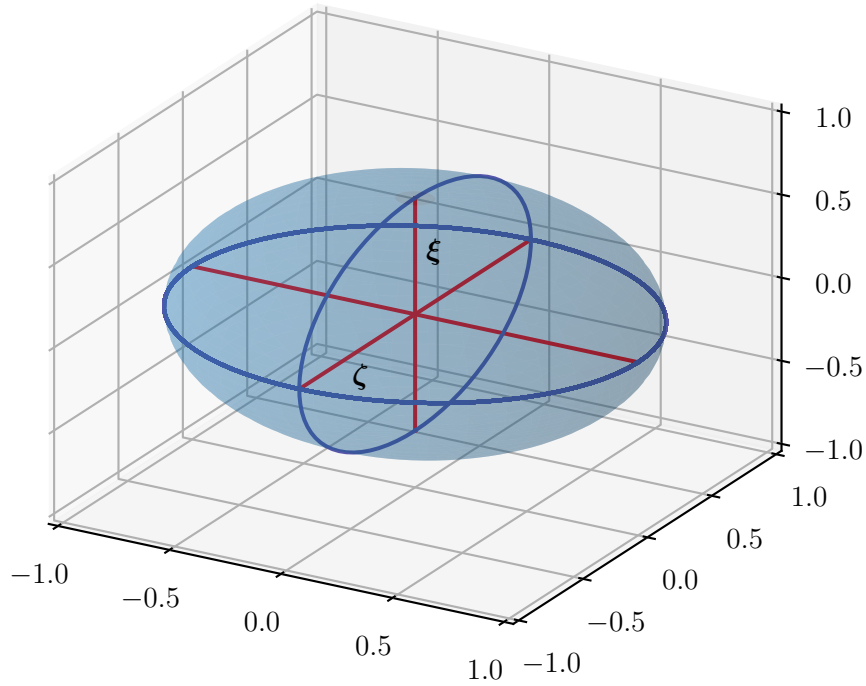
Galaktikate joondumist filamendis näitab pöörlemistelje  $\vec{\omega}$  ja filamendi peatelje  $\vec{n}$  vahelise nurga jaotus. Esitame tulemustes  $|\vec{\omega} \cdot \vec{n}|$  jaotused spiraalsete ja elliptiliste galaktikate jaoks nii lihtsama õhukese ketta kui ka keerulisema ellipsoidilise lähenduse järgi.

### 1.2.1 Galaktika ellipsoidiline mudel

Üldjuhul ei ole kahemõõtmelisest projektsioonist võimalik üheselt taastada galaktika kolmemõõtmelist struktuuri, sest erinevate kujudega ja erinevalt orienteeritud galaktikate projektsioonid saavad olla ühesugused. See-eest on võimalik lahendada vastupidine probleem ning kirjeldades galaktikat parametrizeeritava kolmemõõtmelise objektina, saame hinnata parameetrite jaotust, millele vastab teatud näiv telgede suhe  $q$  ja positsiooninurk  $p$ .

Modelleerime galaktikat ellipsoidina, mille kolm telge võivad olla eripikkused ja mille pöörlemistelg ühtib lühima teljega. Pöörlemistelje suunavektori  $\vec{\omega}$  taastamisel pole olulised telgede absoluutsed pikkused, vaid nende suhtelised pikkused. Galaktika kui ellipsoidi kuju kirjeldame seega kahe parameetriga: lühima ja pikima telje pikkuste suhe  $\xi$  ning kahe pikema telje pikkuste suhe  $\zeta$ . Joonis 1.1 illustreerib meie galaktika mudelit.





Joonis 1.1: Galaktikat modelleeriva ellipsoidi näide, kus lühima ja pikima telje suhe on  $\xi = 0,7$  ja kahe pikema telje suhe on  $\zeta = 0,9$ . Vaatlemisel näeme ellipsikujulise kontuuriga projektsiooni, mille näivate telgede pikkused sõltuvad nurkadest, mille all on ellipsoidi sisemised teljed vaatesihi suhtes.

Koordinaatsüsteemis  $(x, y, z)$ , kus  $z$ -telg on paralleelne galaktika lühima teljega ja  $x$ -telg on paralleelne pikima teljega, kirjeldab ellipsoidi pinda võrrand

$$(\vec{x})^T M \vec{x} = 1, \quad (1.2)$$

$$M = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1/\zeta^2 & 0 \\ 0 & 0 & 1/\xi^2 \end{pmatrix}. \quad (1.3)$$

Ekvatoriaalsetes koordinaatides on kiir, mis lähtub galaktikast ja läbib vaatlejat, pööratud nurga  $\theta$  võrra  $z$ -telje suhtes ning nurga  $\phi$  võrra  $x$ -telje suhtes. Koordinaatsüsteemi  $(x', y', z')$ , kus  $z'$  telg ühtib vaatesihiga ja  $(x', y')$  asuvad taevatasandil viib teisendusmaatriks

$$R = \begin{pmatrix} -\sin(\phi) & -\cos(\phi)\cos(\theta) & \cos(\phi)\sin(\theta) \\ \cos(\phi) & -\sin(\phi)\cos(\theta) & \sin(\phi)\sin(\theta) \\ 0 & \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{pmatrix} \quad (1.4)$$

ja ellipsoidi pinna võrrand on kujul

$$f'(\vec{x}') = (\vec{x}')^T M' \vec{x}' - 1 = 0, \quad (1.5)$$

$$M' = R^T M R. \quad (1.6)$$

### Galaktika projektsioon taevatasandile

Ellipsoidi ortogonaalne projektsioon tasandile on ellips, mida kirjeldavad punktid, kus pinna gradient on risti projekteeritava tasandi normaaliga. Projekteerimine taevatasandile  $(x', y')$  tähendab seda, et otsime punkte, kus gradiendil puudub vaatesuunaline  $z'$  komponent. Kuna pinna gradient avaldub kujul

$$\nabla f'(\vec{x}') = 2M' \vec{x}', \quad (1.7)$$

siis saame tingimuse

$$M'_{31}x' + M'_{32}y' + M'_{33}z' = 0 \implies z' = -\frac{M'_{31}x' + M'_{32}y'}{M'_{33}}. \quad (1.8)$$

Asendades saadud tulemuse ellipsoidi pinna võrrandisse (1.5), saame

$$\begin{pmatrix} x' & y' \end{pmatrix} Q \begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = 1, \quad (1.9)$$

$$Q = \begin{pmatrix} M'_{11} & M'_{12} \\ M'_{21} & M'_{22} \end{pmatrix} - \frac{1}{M'_{33}} \begin{pmatrix} M'_{13} \\ M'_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} M'_{31} & M'_{32} \end{pmatrix}. \quad (1.10)$$

Saadud võrrand kirjeldab ellipsit. Faktoriseerides maatriksi  $Q$  omavektorite  $\vec{e}_1$  ja  $\vec{e}_2$  ning omaväärtuste  $\lambda_1$  ja  $\lambda_2$  kaudu, saame

$$\begin{pmatrix} x' & y' \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \vec{e}_1 & \vec{e}_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \vec{e}_1^T \\ \vec{e}_2^T \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = 1, \quad (1.11)$$

$$\frac{(\vec{e}_1^T (x', y')^T)^2}{\left(\frac{1}{\sqrt{\lambda_1}}\right)^2} + \frac{(\vec{e}_2^T (x', y')^T)^2}{\left(\frac{1}{\sqrt{\lambda_2}}\right)^2} = 1. \quad (1.12)$$

Võrrand (1.9) kirjeldab seega ellipsit, mille pooltelgede pikkused on  $\frac{1}{\sqrt{\lambda_1}}$  ja  $\frac{1}{\sqrt{\lambda_2}}$  ning mille pooltelgede suunad  $(x', y')$  koordinaatides on antud omavektoritega  $\vec{e}_1$  ja  $\vec{e}_2$ .

Kui  $\lambda_1 \geq \lambda_2$ , siis ellipsi lühema ja pikema telje suhe ehk galaktika projektsiooni näiv telgede

suhe on

$$q = \sqrt{\frac{\lambda_1}{\lambda_2}} \quad (1.13)$$

ning ellipsi lühema pooltelje ja  $x'$ -telje vaheline nurk on

$$\psi = \angle \vec{e}_1. \quad (1.14)$$

Siinkohal saadud tulemused langevad numbriliselt kokku Binney (1985) alternatiivse avalduskäiguga saadud tulemustega, kus

$$A \equiv \frac{\cos^2 \theta}{\xi^2} \left( \sin^2 \phi + \frac{\cos^2 \phi}{\zeta^2} \right) + \frac{\sin^2 \theta}{\zeta^2}, \quad (1.15)$$

$$B \equiv \cos \theta \sin 2\phi \left( 1 - \frac{1}{\zeta^2} \right) \frac{1}{\xi^2}, \quad (1.16)$$

$$C \equiv \left( \frac{\sin^2 \phi}{\zeta^2} + \cos^2 \phi \right) \frac{1}{\xi^2}, \quad (1.17)$$

$$q = \sqrt{\frac{A + C - \sqrt{(A - C)^2 + B^2}}{A + C + \sqrt{(A - C)^2 + B^2}}}, \quad (1.18)$$

$$\psi = \frac{1}{2} \arctan \left( \frac{B}{A - C} \right). \quad (1.19)$$

### Galaktika pöörlemistelje suunavektor

Galaktikat vaadeldes näeb vaatleja ellipsit näiva telgede suhtega  $q$ , mille lühem pooltelg on taevas põhja suuna  $N$  suhtes positsiooninurga  $p$  all. Teisendus, mis viib projektsiooni  $(x', y', z')$  koordinaatsüsteemis kohakuti vaadeldud ellipsiga  $(E, N, z')$  koordinaatsüsteemis on pööre ümber  $z'$ -telje nurga  $p - \psi$  võrra

$$P = \begin{pmatrix} \cos(p - \psi) & -\sin(p - \psi) & 0 \\ \sin(p - \psi) & \cos(p - \psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (1.20)$$

kus  $\psi$  on valemiga (1.19) defineeritud  $y'$ - ja  $N$ -telje vaheline nurk.

Eeldades, et galaktika pöörlemistelg langeb kokku selle lühima teljega, annab pöörlemistelje suunavektori  $\vec{\omega}$  komponendid kokkuleppelises koordinaatsüsteemis  $(E, N, z')$  passiivne teisendus

$$\vec{\omega} = P^{-1} R^{-1} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (1.21)$$

Kuna  $P$  ja  $R$  on ortogonaalsed teisendused, siis

$$\vec{\omega} = P^T R^T \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin(\theta) \sin(p - \psi) \\ \sin(\theta) \cos(p - \psi) \\ \cos(\theta) \end{pmatrix}. \quad (1.22)$$

Kasutades valemit (1.18) saame hinnata ellipsoidi telgede  $(\xi, \zeta)$  jaotust, mis sobitab vaadeldud galaktikate projektsioonide telgede suhte  $q$  jaotust. Statistilise modelleerimise tulemusel saame samuti hinnata nurkade  $\theta$  ja  $\phi$  jaotuseid ning valemi (1.22) järgi avaldada galaktika pöörlemistelje suunavektori  $\vec{\omega}$  komponendid.

## 2 Andmed ja meetodid

### 2.1 GAMA galaktikate valim

GAMA on rahvusvaheline projekt, mis kasutab uusima põlvkonna maapealseid ja kosmosepõhiseid teleskoope, et uurida kosmoloogiat ning galaktikate moodustumist ja evolutsiooni. GAMA sisendkataloog põhineb Sloani digitaalse taevaülevaate ja infrapuna-teleskoopuuringu UKIRT andmetel. GAMA (2019)

Kasutame GAMA väljalaske andmebaasis (Baldry et al., 2018) olevaid galaktikaid punanihkel kuni 0,3, mis on valimi äärest vähemalt 5 Mpc kaugusel, sest filamentide leidmise meetod ei ole valimi servas usaldusväärne ja antud töös on oluline uurida galaktikate joondumist filamentide suhtes.

Saan galaktikate valimi suurusega 125 864 rida. Galaktikaid kirjeldavad parameetrid on näiv heledus r-filtris ( $\text{mag}_r$ ), absoluutne heledus r-filtris ( $\text{absmag}_r$ ), punanihe (redshift), näiv suurus taevas (rad) ja Sersicu indeks<sup>1</sup> (sern), mille väärtused on täpsemalt välja toodud tabelis 2.1.

Lisaks on galaktikate andmefailis vaadeldud projektsiooni telgede suhe  $q$ , projektsiooni lühema telje nurk ida suuna suhtes (pos) ja asukohta taevasfääril määravad parameetrid (otsetõus, kääne ja parameeter, mis kirjeldab, millisesse GAMA vaatlusvälja galaktika jääb).

---

<sup>1</sup>Sersicu profiil kirjeldab galaktika radiaalset heledusprofiili  $I(R)$ . Kui Sersicu indeks on  $n$ , siis  $\ln I(R) \propto -R^{1/n}$ . Enamasti on elliptiliste galaktikate Sersicu indeks suurem kui spiraalsetel galaktikatel ehk elliptiliste galaktikate heledusprofiil on rohkem tsentraalselt kontsentreeritud.

	$\text{mag}_r$ [mag]	$\text{absmag}_r$ [mag]	redshift	rad [kaaresekund]	sern	q
keskmine	18,84	-20,66	0,18	3,65	2,34	0,60
standardhälve	0,87	1,10	0,07	1,83	2,24	0,22
miinimum	12,56	-24,15	0,02	1,20	0,01	0,00
25%	18,42	-21,38	0,13	2,55	0,95	0,43
50%	19,06	-20,84	0,18	3,18	1,64	0,62
75%	19,49	-20,10	0,24	4,15	3,07	0,78
maksimum	20,00	-14,79	0,30	43,78	20,00	1,00

Tabel 2.1: Otsustusmetsa treenimiseks ja valideerimiseks kasutatud parameetrid.

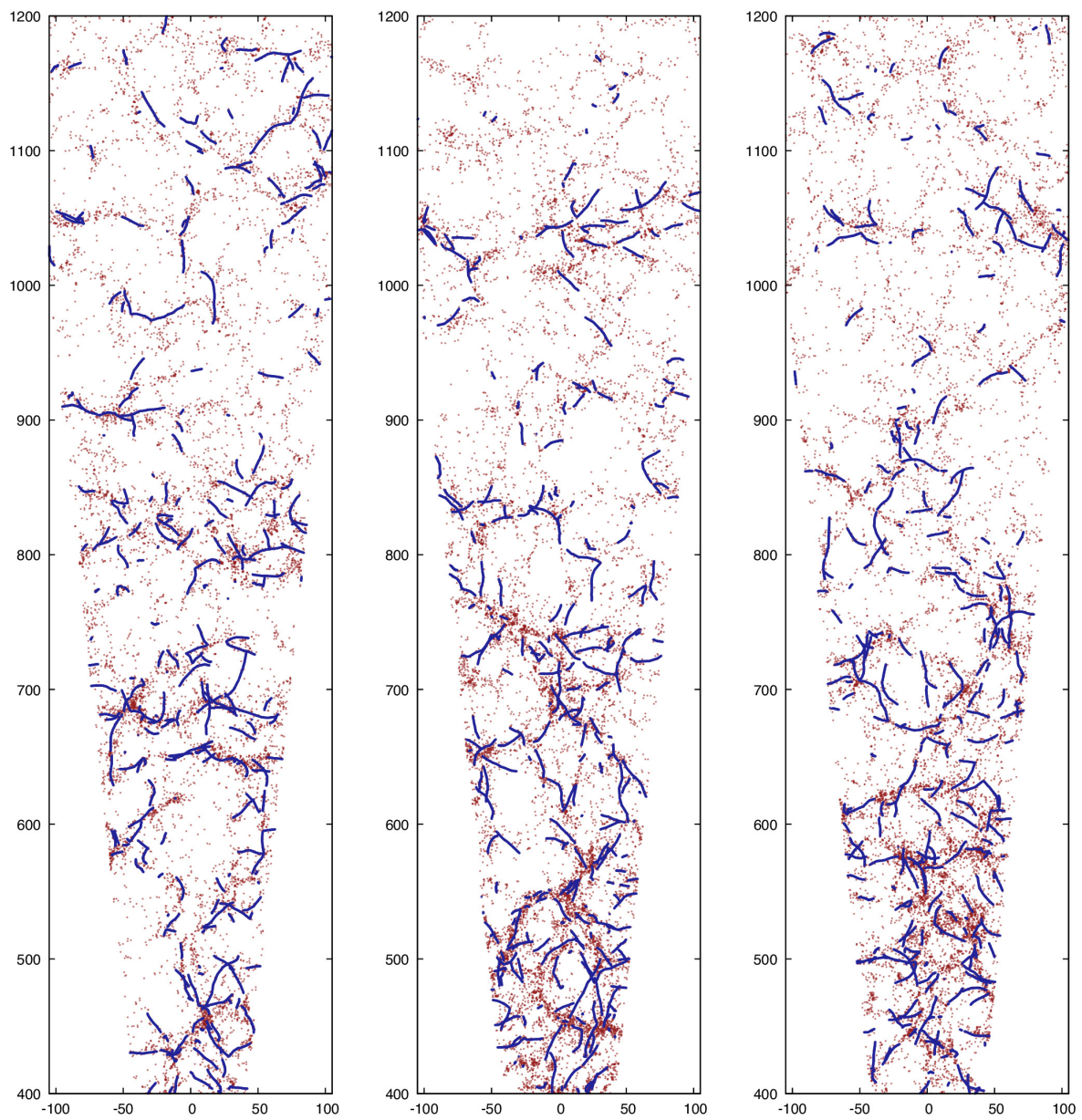
Galaktikate joondumise kontrollimiseks filamentides leiame alamvalimid, mis kirjeldavad spiraalseid ja elliptilisi galaktikaid. Lihtne on klassifikatsioon Sersicu indeksi järgi, mis kirjeldab galaktika heledusprofili kontsentreerumist keskele. Piirame valimid heledematele galaktikatele, kus näiv telgede suhe on väiksem kui 0,9, sest vastasel juhul ei ole positsiooninurk hästi määratletav. Saame

- 1946 spiraalset galaktikat, kus  $q < 0,9$ ,  $\text{absmag}_r < -20,5$  ja  $\text{sern} < 2,0$ ;
- 2207 elliptilist galaktikat, kus  $q < 0,9$ ,  $\text{absmag}_r < -21,0$  ja  $\text{sern} > 2,0$ .

## 2.2 Bisous' mudeli filamendid

Kasutame peatükis 1.1.1 kirjeldatud Bisous' mudeli järgi GAMA andmete põhjal genereeritud filamentide kataloogi. Viime iga eelmises peatükis kirjeldatud spiraalse ja elliptilise galaktika vastavusse sellele lähima filamenti kirjeldava silindrilise lõiguga. Kataloogist saame filamenti modelleeriva silindri peatelje suunavektori  $\vec{n} = (e_x, e_y, e_z)$  koordinaatsüsteemis  $(E, N, z')$ , mis on kirjeldatud peatükis 1.2.1. Joonisel 2.1 on näidatud galaktikate paiknemine GAMA andmetes ja Bisous' mudeli järgi saadud filamentaarne võrgustik.

Kasutades lisaks GAMA andmebaasis olevat infot galaktika paiknemise kohta ja hinnates galaktika pöörlemistelje suunavektorit samas koordinaatsüsteemis, saame leida, kuidas on spiraalsete ja elliptiliste galaktikate teljed seotud filamentide telgedega.



Joonis 2.1: Galaktikad ja Bisous' mudeli filamentaarsed struktuurid GAMA andmete lõigetes. Telgede väärtused on Mpc.

## 2.3 Galaktikate valimi sisemiste telgede pikkuste suhete jaotuse hindamine

Galaktikate valimit kirjeldavad nurkade  $\theta$  ja  $\phi$  jaotused ning kahemõõtmeline telgede suhete  $\xi$  ja  $\zeta$  jaotus. Eelistatud orientatsioonide puudumisel on nurgad  $\theta$  ja  $\phi$  jaotunud ühtlaselt ühiksfääril ehk

$$\cos \theta \sim U(-1, 1), \quad (2.1)$$

$$\phi \sim U(-\pi, \pi). \quad (2.2)$$

Antud valimil on mõõtmistulemuste järgi teatud projektsioonide telgede suhete  $q$  jaotus. Eesmärk on leida galaktika telgede pikkuste suhete  $(\xi, \zeta)$  jaotus, mille põhjal valemi (1.18) järgi ühtib näiva telgede suhte  $q$  jaotus võimalikult hästi tegelike mõõtmistulemustega.

Otsitava  $(\xi, \zeta)$  jaotuse leidmiseks kasutame Bayesi meetodit, mille tulemus sõltub tugevalt algselt valitud jaotusest (*prior distribution*). Varasemalt on näiteks Ryden (2004) hinnanud spiraalgalaktikate ketaste elliptilisust logaritmilise normaaljaotusega  $\ln \varepsilon = -1,85 \pm 0,89$ , mille järgi on lühima ja pikima telje suhe ligikaudu  $\zeta = 0,85^{+0,1}_{-0,2}$  ning Van Den Bosch and Van De Ven (2009) on näidanud, et elliptiliste galaktikate pikemate telgede suhe on ligikaudu 0,9. Seda arvestades valime galaktika klassifikatsioonist sõltumatult  $\zeta$  algjaotuseks normaaljaotuse  $\zeta = 0,85 \pm 0,1$ .

Leidsime proovimise teel, et  $(\xi, \zeta)$  jaotuse kirjeldamiseks valimi järgi ja  $q$  jaotuse sobitamiseks on hea valimi suurus  $N = 150\,000$ . Algjaotuse loomiseks realiseerime (*sample*'ime)  $N$  parameetri  $\zeta$  väärtust ja igale realisatsioonile  $\zeta_j$  paarilise  $\xi_j$  ühtlasest jaotusest  $U(0, \zeta_j)$ . Lisaks realiseerime  $N$  nurkade  $\theta$  ja  $\phi$  väärtust jaotuste (2.1) ja (2.2) järgi. Saame väärtuste nelikud ning valemi (1.18) järgi igale nelikule vastava  $q(\xi, \zeta, \theta, \phi)$  väärtuse.

Mõõtmistulemuste põhjal lähendab tegelikku  $q$  jaotust normeeritud histogramm (väärtuste summa on üks). Teeme histogrammi  $K$  võrdse pikkusega vahemikuga muutumispriirkonnas  $q \in [0, 1]$  ja defineerime  $q$  jaotuse kui funktsiooni  $g(q)$ , mis vahemike keskel on võrdne normeeritud histogrammi väärtustega ja vahepealseid punkte interpoleerib lineaarselt. Genereeritud  $(\xi, \zeta, \theta, \phi)$  valimis määrame igale realisatsioonile kaalu

$$W_i = g(q(\xi_i, \zeta_i, \theta_i, \phi_i)), \quad (2.3)$$

mis kirjeldab, kui tõenäoline antud realisatsioon käesoleva  $q$  jaotuse puhul on.

Kaalude abil lähendame parameetrite  $(\xi, \zeta)$  jaotust kahemõõtmelise tuumameetodil hinnatud



tihedusfunktsiooniga (*kernel density estimate*)

$$f(\xi, \zeta) = \left( \sum_{i=1}^N W_i \right)^{-1} \sum_{i=1}^N W_i T_s(\xi - \xi_i, \zeta - \zeta_i), \quad (2.4)$$

kus tuumafunktsioon on Gaussi funktsioon

$$T_s(x, y) = \frac{1}{2\pi\sqrt{s}} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2s}\right) \quad (2.5)$$

ja silumisparameetri väärtus on  $s = N^{-1/6}$ .

Funktsiooni  $f(\xi, \zeta)$  väärtustamine on ajakulukas, kuid praeguse meetodi puhul ka ebavajalik. Selle jaotuse järgi saab realiseerida (*sample*'ida) väärtuseid järgmise protseduuriga:

1. valida kaalude  $W_1 \dots W_N$  põhjal üks realisatsioon  $(\xi_j, \zeta_j)$ ;
2. realiseerida väärtus Gaussi funktsioonist  $T_s(\xi - \xi_j, \zeta - \zeta_j)$ .

Sel viisil genereerime uue kuni  $N$ -liikmelise valimi  $(\xi', \zeta')$  ning  $\theta'$  ja  $\phi'$  väärtused uuesti jaotuste (2.1) ja (2.2) põhjal. Seejärel kordame kirjeldatud samme, alustades kaalude arvutamisega valemi (2.3) järgi ja lõpetades uue  $(\xi, \zeta, \theta, \phi)$  valimi genereerimisega. Käesolevas töös teeme neid samme jaotuse lähendamiseks iteratiivselt läbi 50 korda.

Kasutatud tuumafunktsiooniga võivad tekkida keelatud realisatsioonid ehk väärtused väljaspool piirkonda  $0 \leq \xi \leq \zeta \leq 1$ , need väärtused lihtsalt kõrvaldame valimist enne järgmise iteratsiooni läbiviimist. Korrektne oleks jaotus normeerida lubatud piirkonnas ja välistada keelatud väärtuste tekkimine, kuid see on arvutuslikult ajakulukas. Kasutatud meetodiga jääb viimastes iteratsioonides väljaspoole piirkonda vähem kui 1% väärtustest ja nende eemaldamine tulemusi oluliselt ei mõjuta.

## 2.4 Galaktika pöörlemistelje suunavektori hindamine

Vaatluste tulemusel on galaktika kohta teada selle elliptilise projektsiooni telgede suhe  $q'$  ja projektsiooni lühema telje nurk  $p'$  kokkuleppelise  $N$ -telje suhtes. Antud galaktika kuulub valimisse, mida kirjeldavad sisemiste telgede suhete jaotus  $f(\xi, \zeta)$  ja ühtlased sisemiste nurkade  $\cos \theta$  ja  $\phi$  jaotused, kuid antud galaktikal on oma parameetrite  $(\xi, \zeta, \theta, \phi)$  jaotus  $h$ , mille järgi on  $q$  just selline nagu vaadeldud.

Jaotuse  $h(\xi, \zeta, \theta, \phi)$  leidmiseks realiseerime 1 000 000 parameetrite  $(\xi, \zeta, \theta, \phi)$  nelikut jaotuste

$f(\xi, \zeta), \cos \theta \sim U(-1, 1)$  ja  $\phi \sim U(-\pi, \pi)$  järgi ning eraldame realisatsioonid, kus

$$|q(\xi, \zeta, \theta, \phi) - q'| < 0,005. \quad (2.6)$$

Saadud  $N$ -liikmelise väärtuste kogumiku järgi hindame otsitavat jaotust tuumameetodil hinnatud tihedusfunktsiooniga (*kernel density estimation*)

$$h(\xi, \zeta, \theta, \phi) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_s(\xi - \xi_i, \zeta - \zeta_i, \theta - \theta_i, \phi - \phi_i), \quad (2.7)$$

kus tuumafunktsioon on Gaussi funktsioon

$$T_s(x, y, t, p) = \frac{1}{4\pi^2 \sqrt{s}} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2 + t^2 + p^2}{2s}\right) \quad (2.8)$$

ja silumisparameetri väärtus on  $s = N^{-1/8}$ .

Pöörlemistelje suunavektori leidmiseks saame realiseerida jaotuse  $h$  järgi  $\xi, \zeta, \theta$  ja  $\phi$  väärtuseid, arvutada valemi (1.19) järgi  $\psi$  ja seejärel valemi (1.22) järgi suunavektori  $\vec{\omega}$  komponendid  $(E, N, z')$ -koordinaatsüsteemis. Jaotuse  $h$  realiseerimiseks kasutame samasugust meetodit nagu kirjeldatud peatükis 2.3 kasutades võrdseid kaalusid  $W_i = 1$ .

## 2.5 Üksikgalaktika pöörlemistelje suunavektori hindamine otsustusmetsa abil

Galaktikate valimit kirjeldab projektsiooni telgede suhte  $q$  jaotus, mille järgi saame hinnata sisemiste telgede suhte  $\xi$  ja  $\zeta$  jaotust nagu kirjeldatud peatükis 2.3. Täpsema hinnangu leidmiseks saame jagada andmed alamvalimiteks (näiteks spiraalsed ja elliptilised galaktikad), aga veelgi parema tulemuse saamiseks kasutame otsustusmetsa meetodit (*random forest*) klassifitseerimisprobleemina. Otsustusmetsa lahknemise kriteeriumiks valime entroopia.

Jagame projektsiooni telgede suhte muutumispiirkonna  $q \in (0, 1]$  võrdsete suurustega  $K$ -ks vahemikuks. Igat galaktikat kirjeldab klass  $k$ , mis on täisarv vahemikus 0 kuni  $K - 1$  ja kuuluvus klassi  $k$  tähendab, et  $q \in (k/K, (k+1)/K]$ . Otsustusmetsa sisendiks on teatud galaktika parameetrid ning väljundiks on tõenäosused, et galaktika kuulub klassi  $k = 0 \dots K - 1$ .

Otsustusmetsa hüperparameetrite ruumi juhusliku otsingu (*random search*) tulemusel leidsime, et piisavalt head väärtused, mis valitud treeningandmeid üle ei sobita (*overfiti*) ja annavad testandmete puhul ennustusvõimelise mudeli on

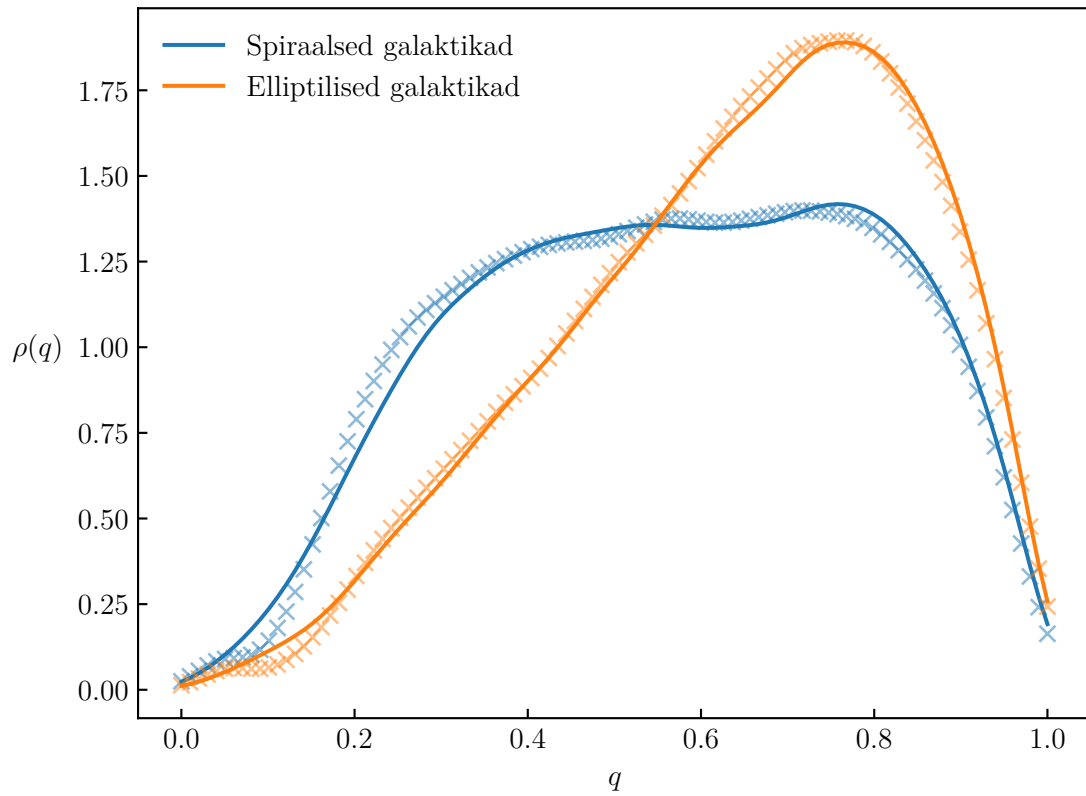
- otsustuspuude arv 100;
- maksimaalne otsustuspuu sügavus 6;
- minimaalne valimi suurus tipu lahknemiseks 600;
- minimaalne valimi suurus otsatipus 100;
- maksimaalne tunnuste arv lahknemise valimisel 2;
- kasutame eri otsustuspuude treeningandmete valimiseks *bootstrap*-meetodit.

Treenitud otsustusmetsa väljund on hinnang  $q$  tõenäosusjaotusele. Käsitledes seda tulemust kui  $q$  jaotust, mis kirjeldab galaktikate valimit, millel on antud galaktikat kirjeldavad parameetrite väärtused, saame hinnata sisemiste telgede suhete  $\xi$  ja  $\zeta$  jaotust nagu kirjeldatud peatükis 2.3. Parameetrid, mille järgi otsustusmetsa treenime, on kirjeldatud tabelis 2.1.

## 3 Tulemused

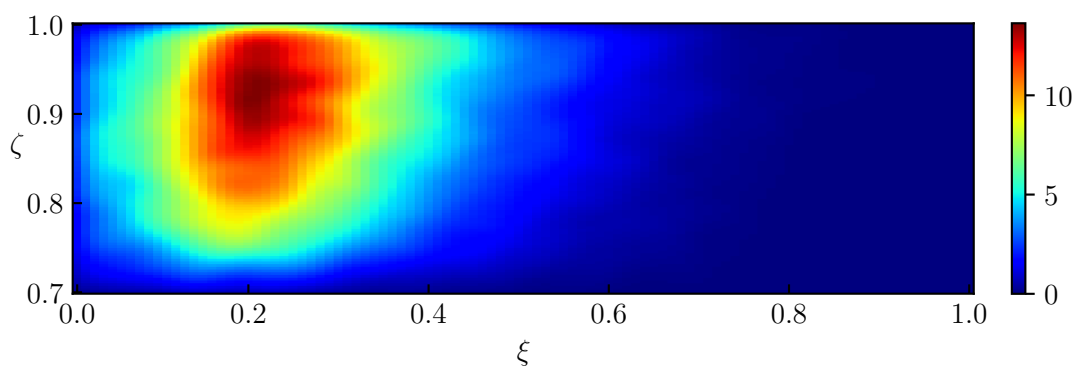
### 3.1 Spiraalsete ja elliptiliste galaktikate sisemiste telgede suhete jaotused

Kasutame peatükis 2.3 kirjeldatud meetodit, et leida galaktikate kui ellipsoidide sisemiste telgede suhete  $(\xi, \zeta)$  jaotused. Proovime leida jaotust  $f(\xi, \zeta)$ , mille järgi arvutatud suvaliselt orienteeritud galaktikate valimi  $q(\xi, \zeta, \theta, \phi)$  jaotus sobitub võimalikult hästi valimi mõõdetud  $q$  jaotusega. Joonisel 3.1 on eraldi sobitamise tulemused spiraalseteks (sern  $< 2, 0$ ) ja elliptilisteks (sern  $> 2, 0$ ) klassifitseeritud galaktikate valimite puhul.

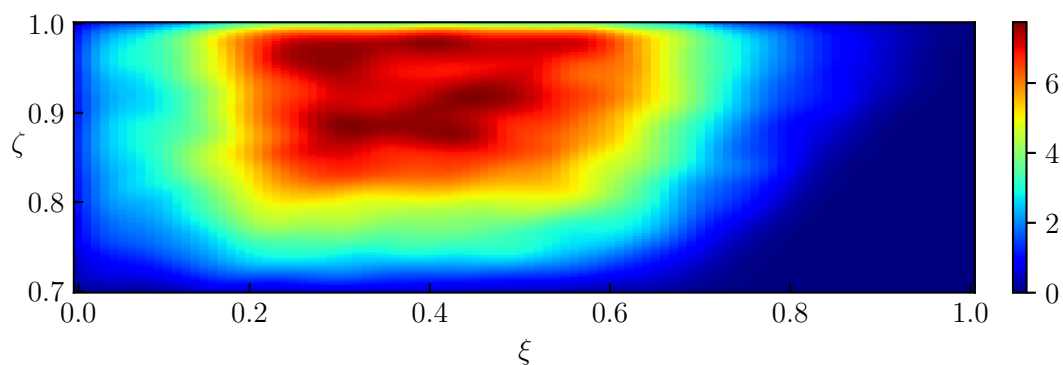


Joonis 3.1: Ristid on valimite näiva telgede suhte  $q$  normeeritud histogrammid ja pidevjooned on sobitatud  $q$  tihedusjaotused.

Joonistel 3.2 ja 3.3 on vastavalt spiraalsete ja elliptiliste galaktikate sisemiste telgede  $(\xi, \zeta)$  jaotused. Spiraalsete galaktikate lühima ja pikima telje suhte  $\xi$  jaotus on sarnane Ryden (2004) leitud tulemusele, kus  $\xi = 0,222 \pm 0,057$ . Elliptiliste galaktikate jaoks on leitud  $\xi$  jaotus suurema dispersiooniga ning ei ole heas kooskõlas näiteks Van Den Bosch and Van De Ven (2009) leitud tulemusega, kus väikse valimi puhul  $\xi = 0,7 \pm 0,1$ . See võib tuleneda asjaolust, et käesolevas töös klassifitseerime galaktikaid ainult Sersicu indeksi järgi, mis ei võimalda saada puhast elliptiliste galaktikate valimit.

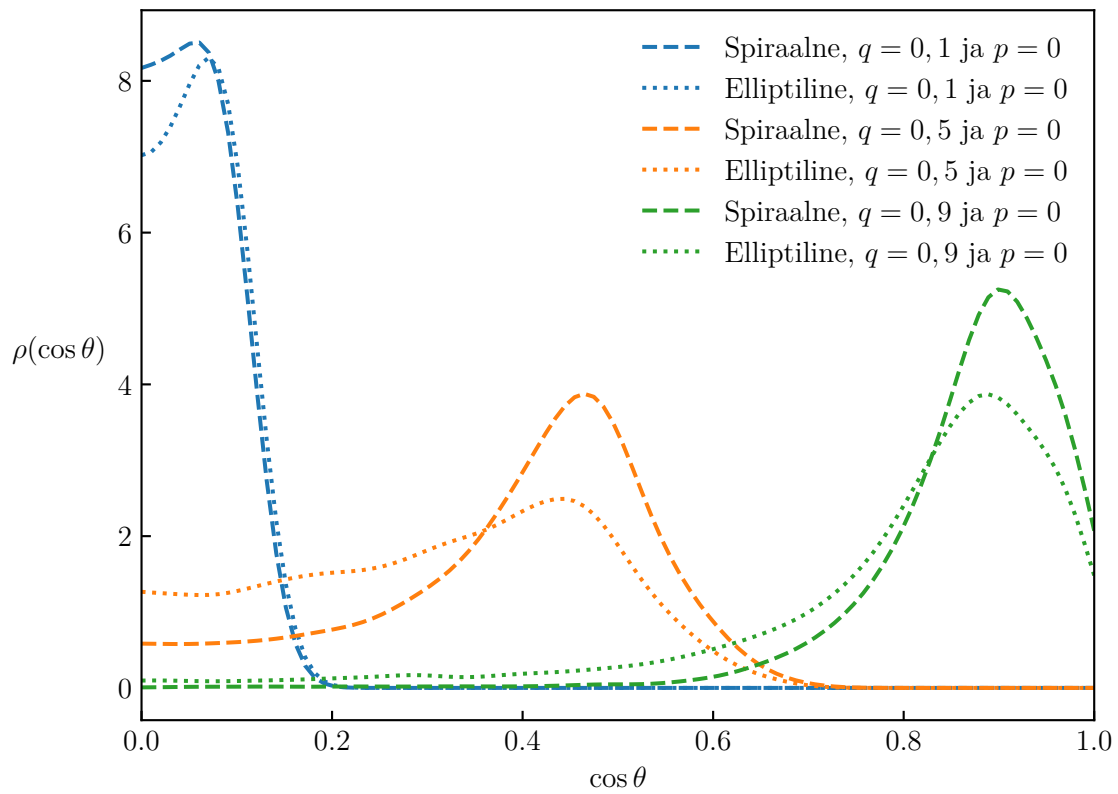


Joonis 3.2: Spiraalsete galaktikate sisemiste telgede  $(\xi, \zeta)$  jaotus.

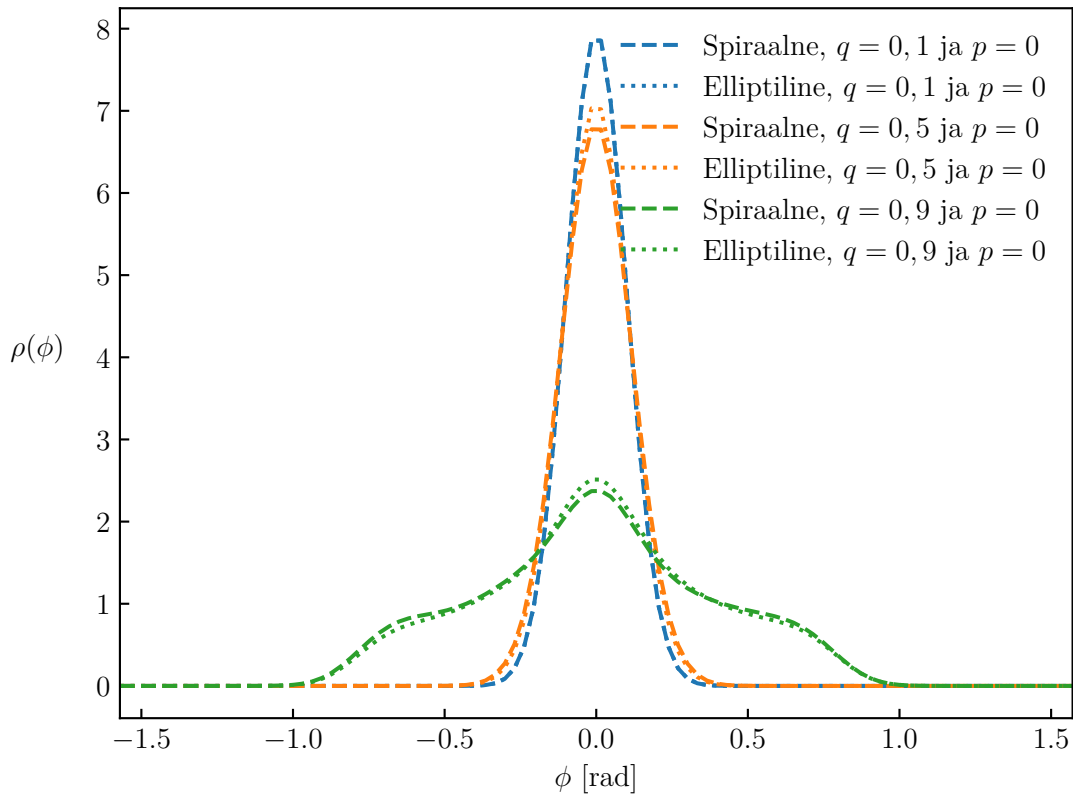


Joonis 3.3: Elliptiliste galaktikate sisemiste telgede  $(\xi, \zeta)$  jaotus.

Kasutades leitud sisemiste telgede  $(\xi, \zeta)$  jaotuseid, saame hinnata galaktika projektsiooni telgede suhte  $q$  ja positsiooninurga  $p$  järgi selle pöörlemistelje orientatsiooni, mille määravad nurgad  $\theta$  ja  $\phi$ . Lõpmatult õhukese ketta lähenduses on  $q = \cos \theta$  ja positsiooninurk  $p = \phi$ , aga ellipsoidilise kirjelduse puhul on nurkadel  $\theta$  ja  $\phi$  nende väärtuste ümber laiemad jaotused. Joonistel 3.4 ja 3.5 on kuvatud nurkade  $\theta$  ja  $\phi$  jaotuste näited üksteisest sõltumatult - tegelikult saame kasutatud meetodiga kahemõõtmelise  $(\theta, \phi)$  jaotuse.



Joonis 3.4: Pöörlemistelje ja vaatesihi vahelise nurga  $\theta$  koosinuse jaotus erinevate projektsioonide puhul. Väiksema  $q$  väärtuse puhul on galaktika pöörlemistelg pigem vaatesihiga risti, suurema  $q$  puhul pigem paralleelne.



Joonis 3.5: Galaktika pikima telje ja vaatesihi vahelise nurga  $\phi$  jaotus erinevate projektsioonide puhul. Üldiselt langeb suurima tõenäosusega nurk  $\phi$  kokku projektsiooni positsiooninurgaga  $p$ .

## 3.2 Otsustusmets

Galaktikate sisemiste telgede  $(\xi, \zeta)$  jaotust hindame nähtava projektsiooni telgede suhte  $q$  jaotuse põhjal peatükis 2.3 kirjeldatud meetodiga. Kuna ühel galaktikal on kindel vaadeldud projektsiooni telgede suhe, siis sellel pole otseselt  $q$  jaotust. Kasutame otsustusmetsa meetodit nii, et leiame, milline oleks  $q$  jaotus antud galaktika teiste parameetrite ( $\text{mag}_r$ ,  $\text{absmag}_r$ , redshift, rad, sern) väärtuste puhul.

Jaotame otsustusmetsa jaoks andmed suvaliselt ligikaudu 75% ulatuses treeningandmeteks ja ligikaudu 25% ulatuses valideerimisandmeteks, mis annab treenimiseks 94296 rida ja valideerimiseks 31568 rida. Otsustusmetsa meetodi hüperparameetrid ja selle rakendamise täpsem kirjeldus on peatükis 2.5.

Otsustusmetsa eesmärgiks on lähendada  $q$  histogrammi. Treenitud otsustusmetsa järgi saame leida iga galaktika jaoks tõenäosuse  $P_i$ , et selle näiv telgede suhe  $q_i$  langeb vahemikku  $0 \dots K-1$ . Meetodi tõhusust hindame selle järgi, kui suure tõenäosusega keskmiselt langeb vaadeldud  $q_i$

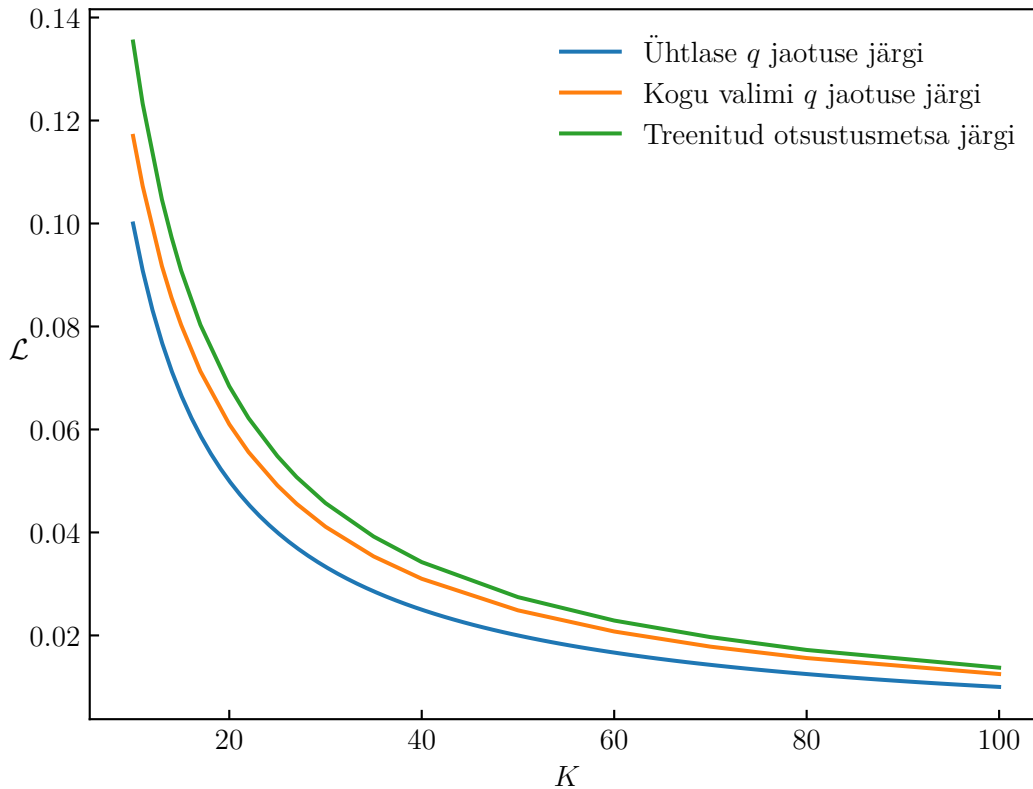


sellele vastavale vahemikku  $k_i$ .

$$\mathcal{L} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_i \left( q_i > \frac{k_i}{K} \wedge q_i \leq \frac{k_i+1}{K} \right) \quad (3.1)$$

Võrdluseks leiame keskmise tõenäosuse kogu galaktikate valimi näiva telgede suhte  $q$  jaotuse järgi, mille jagan sama vahemike arvuga histogrammiks. Halvimal juhul, eeldades ühtlast  $q$  jaotust, on keskmiselt galaktika vaadeldud  $q_i$  väärtuse langemine sellele vastavasse vahemikku  $1/K$ .

Joonisel 3.6 on näidatud otsustusmetsa tõhusus valideerimisandmete ennustamisel erinevate histogrammi vahemike arvu  $K$  juures.



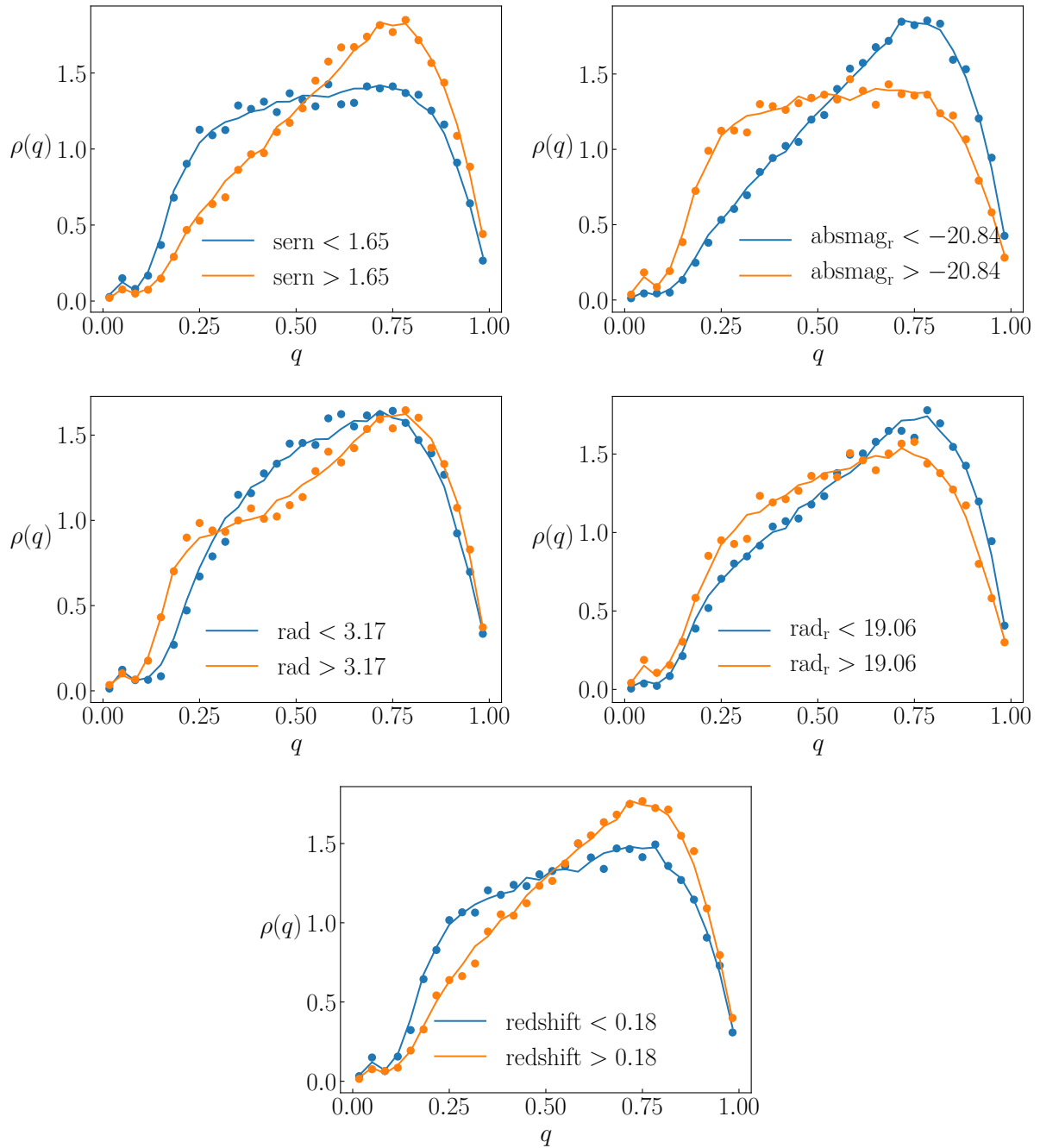
Joonis 3.6: Horisontaalteljel on vahemike arv  $K$ , millesse  $q \in (0, 1]$  jaotatakse. Vertikaaltelje väärtus näitab, kui suure tõenäosusega erinevate meetoditega valideerimisandmetes  $q$  keskmiselt sellele vastavale vahemikku langeb.

Valime edasistes arvutustes vahemike arvuks  $K = 30$ , mis on piisav, et leida hinnang sisemiste telgede  $(\xi, \zeta)$  jaotusele nagu kirjeldatud peatükis 2.3. Klasside arvu  $K = 30$  puhul on otsustusmetsa järgi  $q$  vahemiku arvamistõenäosus keskmiselt 0,46% parem kui hinnang kogu valimi  $q$  jaotuse järgi.

Treenitud otsustusmetsa uurimisel selgub, et  $q$  hindamisel on erinevatel parameetritel erinevad kaalud. Panuse järgi otsustusmetsa entroopia muutusesse on parameetrid olulisuse järjekorras

1. absoluutne heledus r-filtris ( $\text{absmag}_r$ , 32%),
2. Sersicu indeks (sern, 32%),
3. näiv suurus taevas (rad, 21%),
4. näiv heledus r-filtris ( $\text{mag}_r$ , 9%),
5. punanihe (redshift, 6%).

Otsustusmetsa õigsuse kontrollimiseks võrdleme joonisel 3.7 valideerimisandmete erinevate parameetrite 0,5-kvantiilide järgi kaheks jaotatud  $q$  histogramme vaatluste ja otsustusmetsa järgi.



Joonis 3.7: Täppidega on näidatud valideerimisandmetes eri parameetrite 0,5-kvantiilide järgi valitud alamvalimite  $q$  tihedusjaotusteks  $\rho(q)$  normeeritud histogrammid. Pidevjooned näitavad samamoodi normeeritud otsustusmetsa põhjal arvatud keskmiseid tõenäosuseid, et  $q$  langeb histogrammi erinevatesse vahemikkudesse.

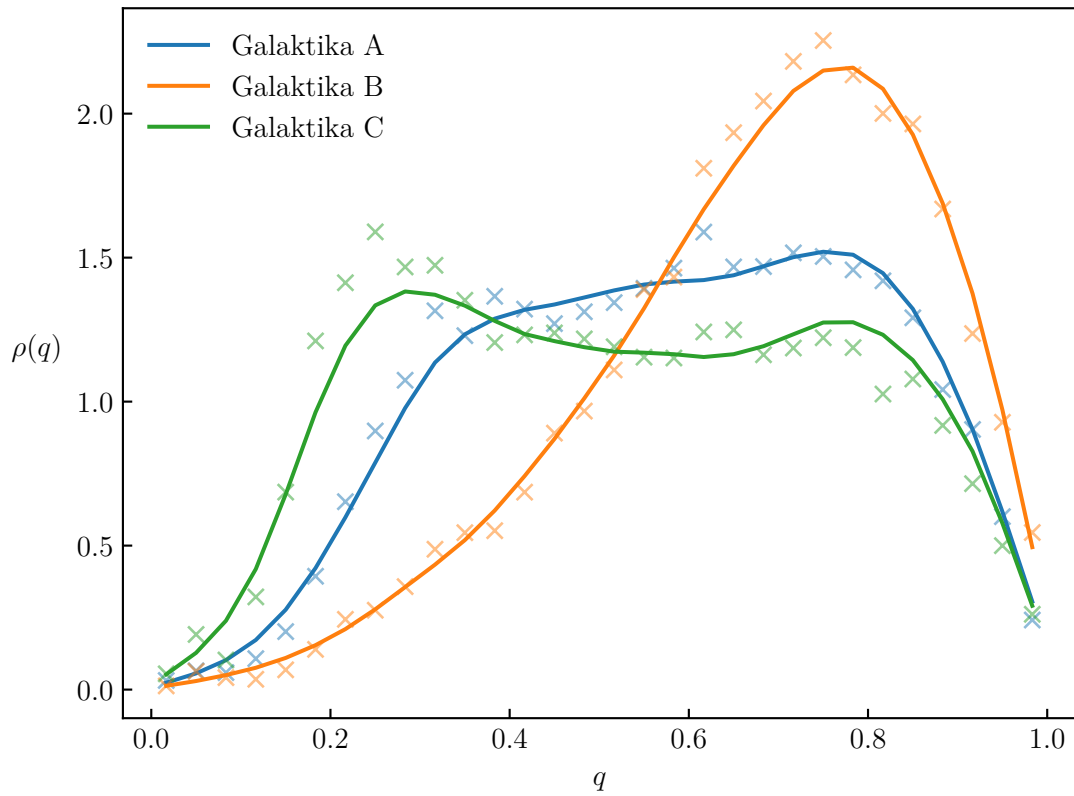
### 3.2.1 Otsustusmetsa tulemused kolme galaktika näitel

Lisaks galaktikate valimi histogrammi lähedasele hindamisele on oluline, et otsustusmetsa põhjal leitud  $q$  jaotus ühe galaktika parameetrite järgi oleks sobitatav peatükis 2.3 kirjeldatud meetodiga. Valime otsustusmetsa tulemuste uurimiseks valideerimisandmete seast suvaliselt kolm galaktikat, mis on kirjeldatud tabelis 3.1.

	$\text{mag}_r$ [mag]	$\text{absmag}_r$ [mag]	redshift	rad [kaaresekund]	sern	q
A	19,64	-20,98	0,26	3,34	0,90	0,27
B	19,27	-21,37	0,26	3,29	4,06	0,79
C	19,58	-19,35	0,13	3,51	0,70	0,41

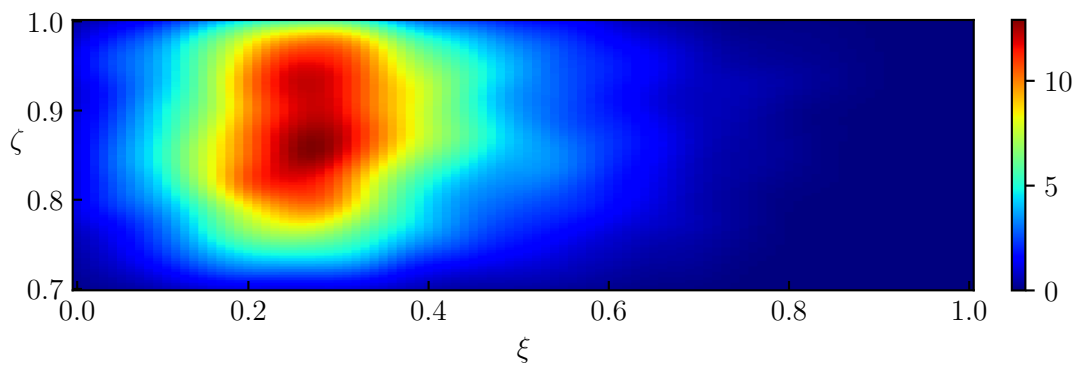
Tabel 3.1: Otsustusmetsa uurimiseks valitud kolme galaktika andmed.

Joonisel 3.8 on näidatud valitud galaktikate otsustusmetsa järgi hinnatud  $q$  normeeritud histogrammi ja selle põhjal peatükis 2.3 kirjeldatud meetodiga lähendatud tihedusjaotust.

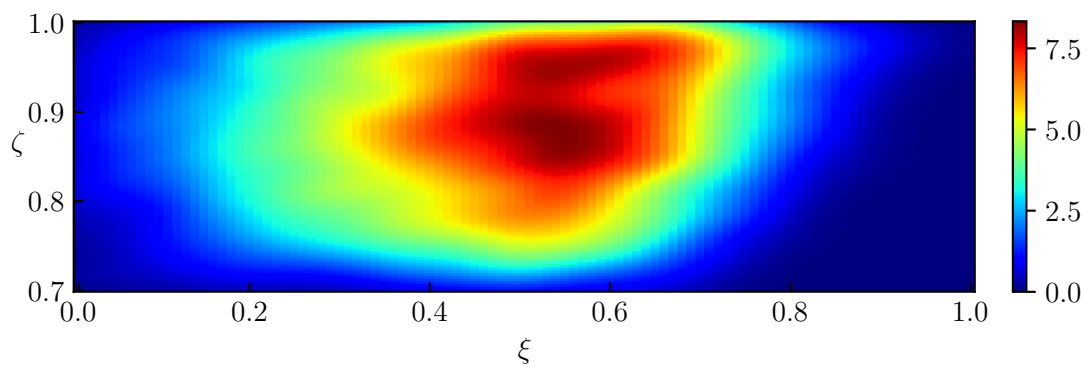


Joonis 3.8: Ristid näitavad otsustusmetsa järgi ennustatud näiva telgede suhte  $q$  normeeritud histogrammi ning pidevjooned selle järgi sobitatud tihedusjaotuse lähendit.

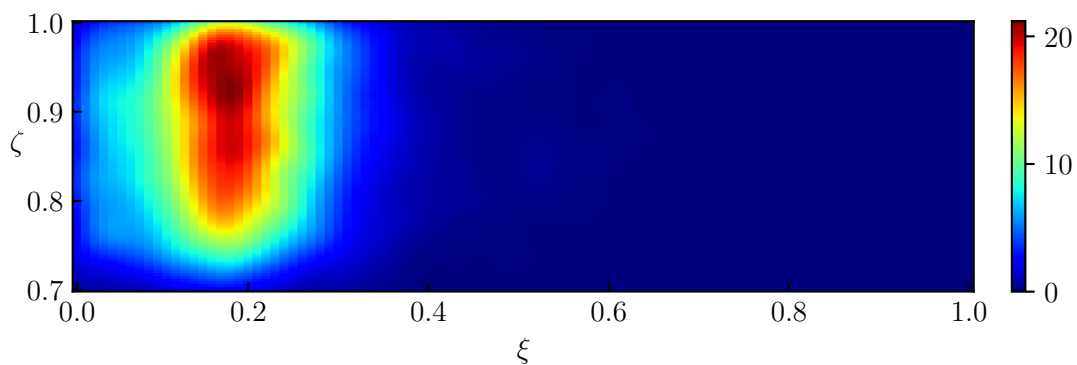
Valitud galaktikate hinnatud  $q$  histogrammidele sobitatud sisemiste telgede suhete ( $\xi$ ,  $\zeta$ ) jaotused on toodud joonistel 3.9, 3.10 ja 3.11. Võrreldes spiraalsete ja elliptiliste galaktikate valimite ( $\xi$ ,  $\zeta$ ) jaotustega joonistel 3.2 ja 3.3 näib, et galaktikad A ja C on pigem spiraalsed ja galaktika B on pigem elliptiline.



Joonis 3.9: Galaktika A sisemiste telgede jaotus.

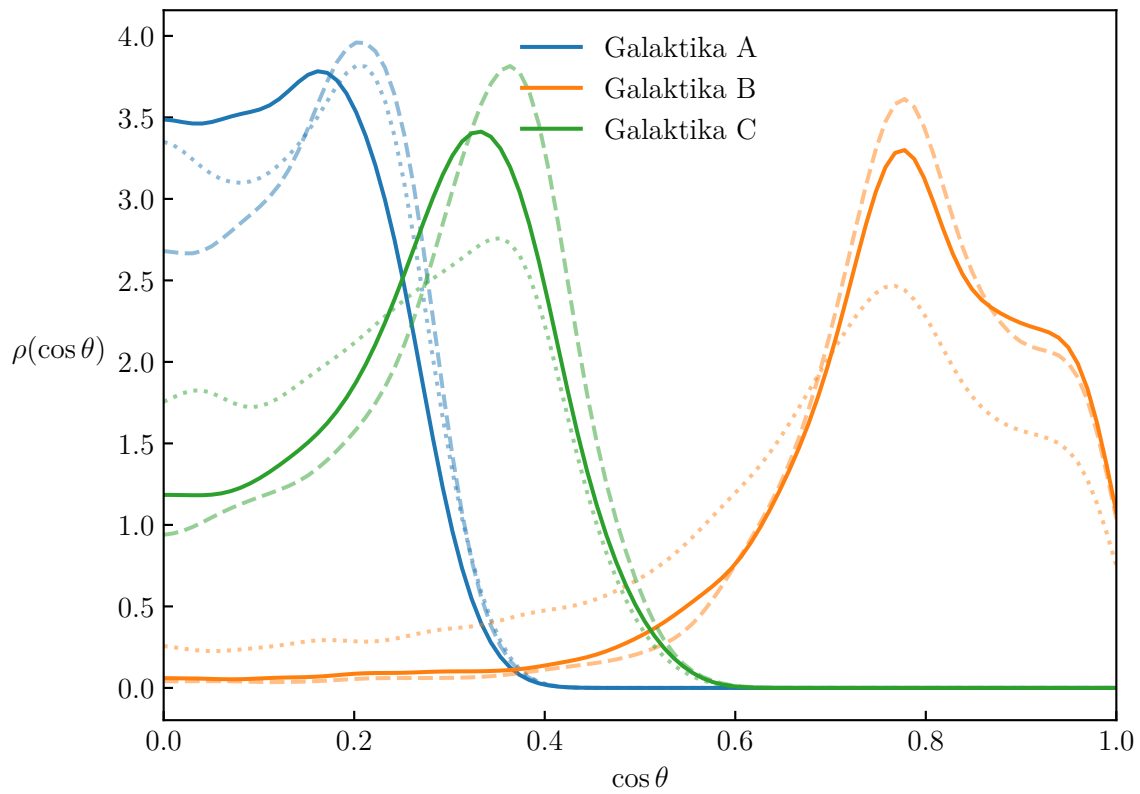


Joonis 3.10: Galaktika B sisemiste telgede jaotus.

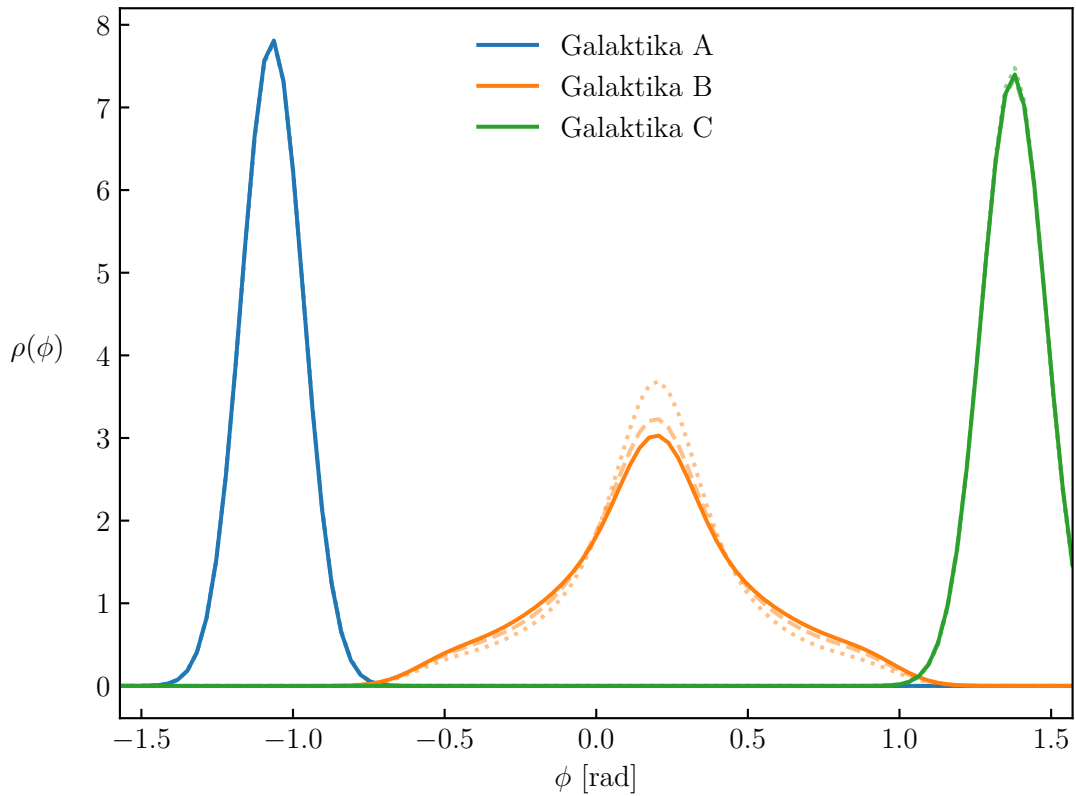


Joonis 3.11: Galaktika C sisemiste telgede jaotus.

Joonistel 3.12 ja 3.13 on otsustusmetsa abil leitud sisemiste telgede  $(\xi, \zeta)$  jaotuste järgi hinnatud galaktikate A, B ja C pöörlemistelgede orientatsioone määravate nurkade  $\theta$  ja  $\phi$  jaotused. Võrdluseks on välja toodud ka jaotused juhul, kui eeldada sisemiste telgede jaotusteks sellised nagu leidsime peatükis 3.1 spiraalsete ja elliptiliste galaktikate jaoks.



Joonis 3.12: Pöörlemistelje ja vaatesihi vahelise nurga  $\theta$  koosinuse jaotus suvaliselt valitud galaktikate puhul. Pidevjoonega on tulemus otsustusmetsa abil saadud sisemiste telgede suhete  $(\xi, \zeta)$  jaotuse järgi, katkendliku joonega spiraalsete galaktikate  $(\xi, \zeta)$  jaotuse järgi ja punktiirjoonega elliptiliste galaktikate  $(\xi, \zeta)$  jaotuse järgi.



Joonis 3.13: Galaktika pikima telje ja vaatesihi vahelise nurga  $\phi$  jaotus suvaliselt valitud galaktikate puhul. Pidevjoonega on tulemus otsustusmetsa abil saadud sisemiste telgede suhete  $(\xi, \zeta)$  jaotuse järgi, katkendliku joonega spiraalsete galaktikate  $(\xi, \zeta)$  jaotuse järgi ja punktiirjoonega elliptiliste galaktikate  $(\xi, \zeta)$  jaotuse järgi.

Joonistelt 3.4, 3.5, 3.12 ja 3.13 ilmneb, et galaktika sisemiste telgede  $(\xi, \zeta)$  korrektne leidmine ei mõjuta oluliselt nurga  $\phi$  hinnangut, küll aga on märgatav erinevus nurga  $\theta$  hindamisel.

### 3.3 Galaktikate telgede joondumine

Galaktikate telgede joondumise uurimiseks realiseerime (*sample*'ime) peatükis 2.4 kirjeldatud meetodiga pöörlemistelje  $\vec{\omega}$  realisatsioone ja leiame  $\vec{\omega}$  ja filamendi peatelje  $\vec{n}$  vahelise nurga koosinuse  $|\vec{n} \cdot \vec{\omega}|$  normeeritud histogrammi. Seejärel kasutame *bootstrap*-meetodit, et leida histogrammide keskmised ja 95%-lised usaldusnivood.

Pöörlemistelje hindamiseks kasutasime nii peatükis 3.1 leitud spiraalsete ja elliptiliste galaktikate sisemiste telgede  $(\xi, \zeta)$  jaotuseid kui ka otsustusmetsa abil leitud  $(\xi, \zeta)$  jaotuseid ning leidsime, et  $|\vec{n} \cdot \vec{\omega}|$  jaotused olid kummalgi juhul praktiliselt samad. See näitab, et treenitud

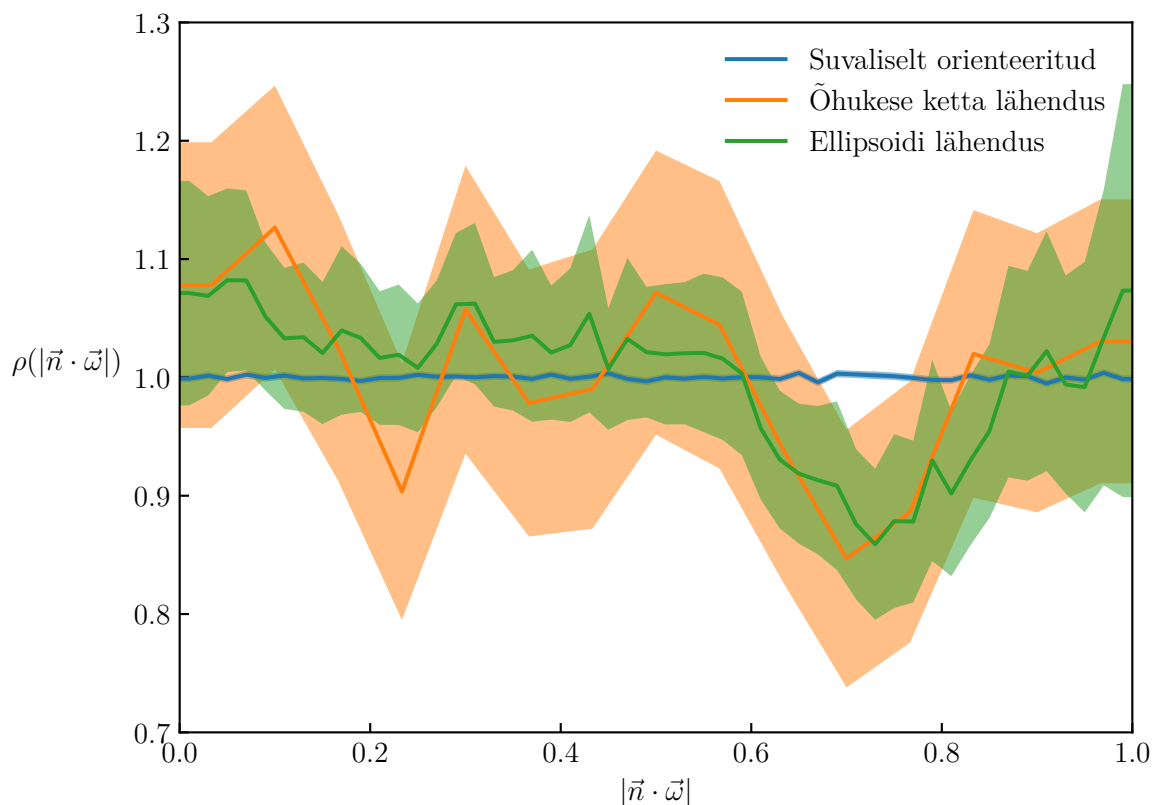


otsustusmets eristab spiraalseid ja elliptilisi galaktikaid vähemalt sarnase tõhususega nagu meelevaldselt Sersicu indeksi järgi eristades ning seda, et ilmselt pole eri klassi galaktikate valimite seas sisemiste telgede pikkuste suhete jaotustes kuigi suurt varieeruvust. Näitame järgmistes alapeatükkides tulemusi ellipsoidilise lähenduse puhul otsustusmetsa meetodi põhjal.

Leidsime, et võrreldes ketta lähendusega on ellipsoidi lähenduse puhul  $|\vec{n} \cdot \vec{\omega}|$  jaotuse määramatus keskmiselt ligikaudu 40% väiksem.

### 3.3.1 Spiraalsete galaktikate telgede joondumine

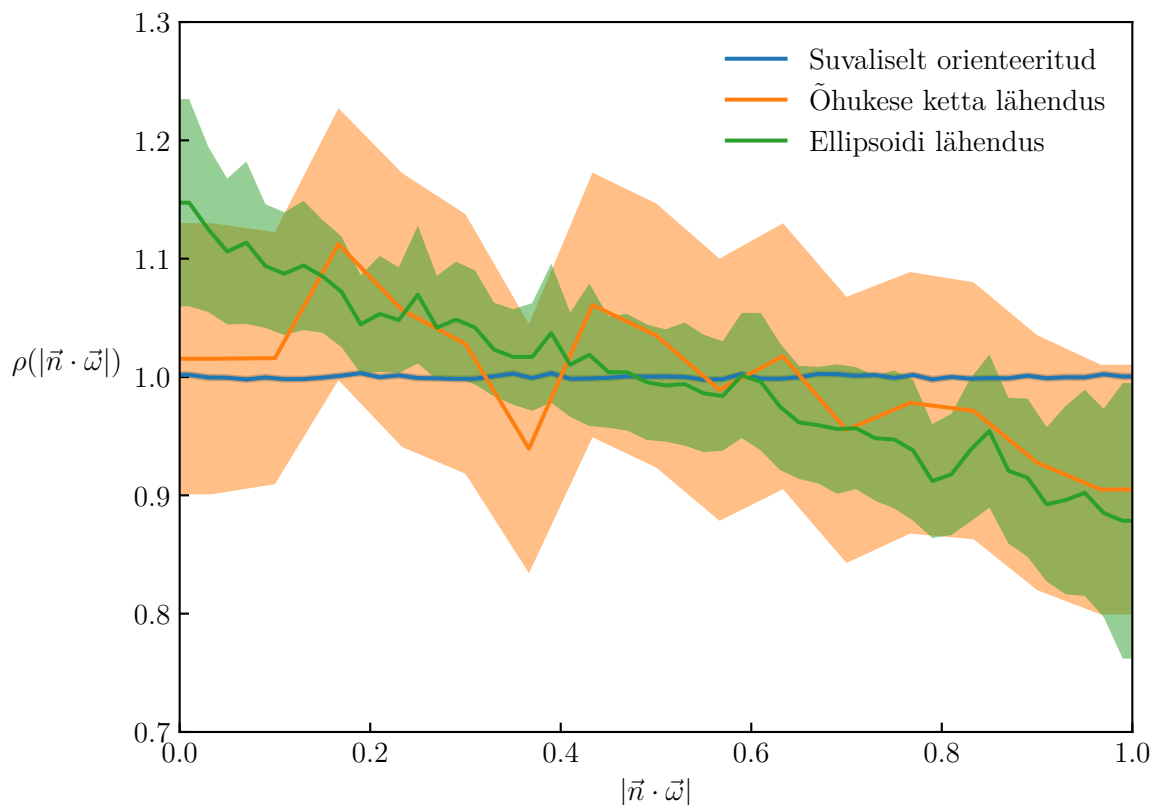
Varasemalt on näiteks Tempel et al. (2013) leidnud, et spiraalsete galaktikate pöörlemisteljed  $\vec{\omega}$  on eelistatult filamendi peateljega  $\vec{n}$  paralleelsed, kuid käesolevas töös kasutatud spiraalsete galaktikate valimi puhul seda tulemust me ei korranud. Pigem näib joonise 3.14 põhjal, et spiraalsete galaktikate seas on kaks alamvalimit, millest ühtede pöörlemisteljed on filamentidega eelistatult paralleelsed ja teised risti.



Joonis 3.14: Spiraalsete galaktikate pöörlemistelgede ja filamentide peatelgede vahelise nurga koosinuse  $|\vec{n} \cdot \vec{\omega}|$  jaotused 95%-liste usaldusnivoodega.

### 3.3.2 Elliptiliste galaktikate telgede joondumine

Elliptiliste galaktikate puhul leidsime samasuguse telgede joondumise signaali nagu Tempel et al. (2013) - galaktika pöörlemistelg  $\vec{\omega}$  on eelistatult filamenti peateljega  $\vec{n}$  risti. Joonisel 3.15 on näha, et ellipsoidi lähenduse puhul on joondumissignaali palju veenvam kui lõpmatult õhukese ketta lähenduse korral.



Joonis 3.15: Elliptiliste galaktikate pöörlemistelgede ja filamentide peatelgede vahelise nurga koosinuse  $|\vec{n} \cdot \vec{\omega}|$  jaotused 95%-liste usaldusnivoodega.

# Kokkuvõte

Käesoleva töö eesmärgiks oli hinnata galaktikate pöörlemistelgede suundasid ruumis ning uurida galaktikate joondumist filamentides - Universumi suuremastaabilise struktuuri silmapaistvaimates struktuuriüksustes. Kasutasime galaktikate kirjeldamiseks kolmeteljelise ellipsoidi mudelit, mille sisemiste telgede hindamiseks rakendasime Bayesi meetodit ja otsustusmetsa.

Kasutatud meetodis on otsustusmetsa roll galaktika struktuuri taastamisel kasutada ära lisaks projektsiooni kontuurile teadaolevat informatsiooni nagu heledusprofiili kuju ja absoluutne heledus. Otsustusmetsa järgi on hinnangud galaktikate kui ellipsoidide sisemiste telgede pikkuste suhete jaotustele küll erinevad, kuid pöörlemistelgede joondumise uurimisel ei anna otsustusmetsa rakendamine olulist panust.

Tulemused näitavad, et ainuüksi projektsioonide põhjal galaktikate ja filamentide joondumise uurimisel on statistilise modelleerimise rakendamine väga oluline, et suure müraga tulemustest statistiliselt usaldusväärne tulemus saada. Ilma korrektse modelleerimiseta on galaktikate pöörlemistelgede joondumise tulemused statistiliselt ebausaldusväärsed, aga antud töös kasutatud meetod võimaldas saada usaldusväärsed tulemused.

Käesolevas töös välja töötatud meetod võimaldab tulevikus galaktikate joondumist Universumi suuremastaabilises struktuuris uurida väiksemate alamvalimite kaupa, sest statistiliselt usaldusväärse tulemuse saamiseks piisab võrdlemisi väiksest valimist.

# Tänuavaldused

Tänan oma juhendat Elmo Tempelit, kes kiire ja konkreetse tagasidega aitas lõputööl valmida ning positiivse suhtumisega selle tegemise meeldivaks tegi.

Gutnar Leede

# Kirjandus

- Baldry, I. K., Liske, J., Brown, M. J. I., Robotham, A.Š. G., Driver, S. P., Dunne, L., Alpaslan, M., Brough, S., Cluver, M. E., Eardley, E., Farrow, D. J., Heymans, C., Hildebrandt, H., Hopkins, A. M., Kelvin, L.Š., Loveday, J., Moffett, A. J., Norberg, P., Owers, M.Š., Taylor, E. N., Wright, A. H., Bamford, S. P., Bland-Hawthorn, J., Bourne, N., Bremer, M. N., Colless, M., Conselice, C. J., Croom, S. M., Davies, L. J. M., Foster, C., Grootes, M. W., Holwerda, B. W., Jones, D. H., Kafle, P. R., Kuijken, K., Lara-Lopez, M. A., López-Sánchez, Á. R., Meyer, M. J., Phillipps, S., Sutherland, W. J., van Kampen, E., and Wilkins, S. M. (2018). Galaxy And Mass Assembly: the G02 field, Herschel-ATLAS target selection and data release 3. , 474:3875–3888.
- Binney, J. (1985). Testing for triaxiality with kinematic data. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 212:767–781.
- Dressler, A. (1980). Galaxy morphology in rich clusters - Implications for the formation and evolution of galaxies. , 236:351–365.
- Einasto, J., Saar, E., Kaasik, A., and Chernin, A. D. (1974). Missing mass around galaxies: morphological evidence. *Nature*, 252(5479):111–113.
- Forero–Romero, J. E., Hoffman, Y., Gottlöber, S., Klypin, A., and Yepes, G. (2009). A dynamical classification of the cosmic web. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 396(3):1815–1824.
- GAMA (2019). Gama.
- Hahn, O., Porciani, C., Carollo, C. M., and Dekel, A. (2007). Properties of dark matter haloes in clusters, filaments, sheets and voids. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 375(2):489–499.
- Novikov, D., Colombi, S., and Doré, O. (2006). Skeleton as a probe of the cosmic web: the two-dimensional case. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 366(4):1201–1216.

- Platen, E., Van De Weygaert, R., and Jones, B. J. T. (2007). A cosmic watershed: the WVF void detection technique. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 380(2):551–570.
- Ryden, B.Š. (2004). The ellipticity of the disks of spiral galaxies. *The Astrophysical Journal*, 601(1):214–220.
- Tempel, E., Saar, E., and Stoica, R.Š. (2013). Evidence for spin alignment of spiral and elliptical/S0 galaxies in filaments. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 428(2):1827–1836.
- Tempel, E., Stoica, R.Š., Martínez, V. J., Liivamägi, L. J., Castellan, G., and Saar, E. (2014). Detecting filamentary pattern in the cosmic web: a catalogue of filaments for the SDSS. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 438(4):3465–3482.
- Van Den Bosch, R. C. E. and Van De Ven, G. (2009). Recovering the intrinsic shape of early-type galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 398(3):1117–1128.
- Zeldovich, Y. B., Einasto, J., and Shandarin, S. F. (1982). Giant voids in the universe. *Nature*, 300(5891):407–413.

# **Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks**

Mina, Gutnar Leede,

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose

**Galaktikate pöörlemistelgede leidmine otsustusmetsa ja Bayesi meetodiga,**

mille juhendaja on Elmo Tempel, reprodutseerimiseks eesmärgiga seda säilitada, sealhulgas lisada digitaalarhiivi DSpace kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.

2. Annan Tartu Ülikoolile loa teha punktis 1 nimetatud teos üldsusele kättesaadavaks Tartu Ülikooli veebikeskkonna, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace kaudu Creative Commons'i litsentsiga CC BY NC ND 3.0, mis lubab autorile viidates teost reprodutseerida, levitada ja üldsusele suunata ning keelab luua tuletatud teost ja kasutada teost ärieesmärgil, kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.
3. olen teadlik, et punktis 1 ja 2 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
4. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Gutnar Leede,

Tartu, 3. juuni 2019. a.